

# 基于数据融合的变电站无线传感器网络控制方法

黄琪训, 刘璨真, 曾伟胜, 钟岳坤, 张文裕

(广东电网有限责任公司汕尾供电局, 广东 汕尾 516600)

**摘要:** 变电站无线传感器网络控制过程中存在网络生命周期短的问题, 为此, 提出基于数据融合的变电站无线传感器网络控制方法。建立变电站无线传感器网络拓扑结构模型, 通过格拉布斯准则, 剔除无线传感器的冗余节点数据; 通过最短路径树构造无线传感器网络数据传输路径, 并基于蚁群算法求解最短路径树完成数据融合, 实现变电站无线传感器的网络覆盖控制。实验结果表明, 所提方法的变电站无线传感器生命周期更长、效率更高、数据融合延迟效果更好, 整体应用效果更佳。

**关键词:** 数据融合; 蚁群算法; 无线传感器; 格拉布斯准则; 覆盖控制

中图分类号: TP273; TP393 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0024-04

## Control Method of Wireless Sensor Network in Substation Based on Data Fusion

HUANG Qi-xun, LIU Can-zhen, ZENG Wei-sheng, ZHONG Yue-kun, ZHANG Wen-yu

(Shanwei Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Shanwei 516600 China)

**Abstract:** The problem of short network life cycle exists in the control process of wireless sensor network in substation. Therefore, a control method of wireless sensor network in substation based on data fusion is proposed. The topology model of wireless sensor network in substation is established, and the redundant node data of wireless sensor is eliminated by Grubbs criterion. The shortest path tree is used to construct the data transmission path of wireless sensor network, and the ant colony algorithm is used to solve the shortest path tree to complete the data fusion, and the network coverage control of wireless sensor in substation is realized. The experimental results show that the proposed method has longer life cycle, higher efficiency, better data fusion delay effect, and better overall application effect.

**Keywords:** data fusion; ant algorithm; wireless sensor; grabbs criterion; coverage control

### 0 引言

无线传感器是计算机时代一种新型通信技术, 目前已被广泛应用在智能电网中。良好的通信网络是变电站自动化运行的基础, 无线传感器具有大量微型传感器节点、传输迅速的特点, 大大提高变电站的通信水平。但无线传感器在变电站的通信应用中仍然存在覆盖能力弱、易受到其他干扰等问题, 变电站无线传感器网络控制方法的研究有望为无线传感器的应用发展带来新技术支持, 具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

石元博<sup>[3]</sup>等人首先构建无线传感器网络拓扑模型; 其次, 通过哈密顿-雅可比-贝尔曼方程建立无线传感器系统的控制器; 最后, 通过检验函数进一步推导控制器的抗干扰能力。该方法存在网络生命周期短的问题。龚本灿<sup>[4]</sup>等人首先基于博弈论建立无线传感器网络拓扑模型; 其次, 对该模型实行分析; 最后, 通过双效用函数的拓扑

博弈算法完成无线传感器的控制。该方法存在控制效果不佳的问题。魏连锁<sup>[5]</sup>等人构建势博弈无线传感器网络拓扑模型; 其次, 通过刚性子图矩阵去除无线传感器拓扑结构中的冗余链路信息; 最后, 完成无线传感器的控制。该方法存在时延延长的的问题。

为了解决上述方法中存在的问题, 提出基于数据融合的变电站无线传感器网络控制方法。建立变电站无线传感器网络拓扑结构模型, 通过格拉布斯准则对无线传感器模型内的节点实行剔除处理, 基于蚁群算法的数据融合树完成变电站无线传感器网络控制。经实验验证, 所提方法的网络覆盖率在 100 s 时, 仍可保持在 20%。

### 1 变电站无线传感器网络

变电站无线传感器网络首先建立变电站无线传感器网络拓扑结构模型。用  $B=\{1, 2, \dots, n\}$  表示分布在矩形区域内组成变电站无线传感器的节点集合,  $P=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  表示通讯范围内节点间传输需要的功率集合<sup>[6]</sup>,  $R=(o, k) \in B \times B, o \neq k$  表示节点间传输的链路集合。变电站

\*基金项目: 南方电网公司科技项目资助 (031500KK52220010)

收稿日期: 2023-10-18

无线传感器表示为  $H=(B, R, P)$ , 定义变电站无线传感器的节点度、平均节点度和节点连通性, 具体定义如下。

定义1: 变电站无线传感器的节点度

用  $r_o$  表示节点  $o$  的邻居节点, 其集合为  $R_o$ , 用节点度  $L_o$  表示邻居节点的元素个数。

定义2: 变电站无线传感器的平均节点度

平均节点  $L_{rb}$  即无线传感器中所有节点长度之和与节点数目的比值, 其公式如下:

$$L_{rb} = \sum_{o=1}^m \frac{L_o}{m} \quad (1)$$

式中,  $m$  表示节点度数。

定义3: 变电站无线传感器的节点连通性

对于任意两个节点  $o, k$ , 当  $F(o, k)=1$  时, 则两节点连通。

## 2 节点数据预处理

由于变电站无线传感器内存在众多冗余数据, 需基于变电站无线传感器网络拓扑结构模型, 对节点数据进行预处理。本研究通过格拉布斯准则对无线传感器模型内的节点进行剔除处理, 以减少粗大误差<sup>[7]</sup>。

首先计算节点  $k$  的平均值  $\bar{c}_k$ , 其公式如下:

$$\bar{c}_k = \frac{1}{n} \sum_{o=1}^n c_{ko} L_{rb}, o = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中,  $c_{ko}$  表示节点变量,  $n$  表示节点个数。

计算节点  $k$  的标准差  $\varsigma_k$ , 其公式如下:

$$\varsigma_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{o=1}^n (c_{ko} - \bar{c}_k)^2} \quad (3)$$

进一步得到格拉布斯统计量  $Y_{ko}$ , 其公式如下:

$$Y_{ko} = \frac{\|c_{ko} - \bar{c}_k\|}{\varsigma_k} \quad (4)$$

式中,  $s$  表示显著水平,  $n$  表示测量次数, 设置格拉布斯准则的临界值  $Y(n, s)$ , 剔除其数据内容。

## 3 无线传感器网络控制

完成无线传感器节点冗余数据剔除处理后, 需对无线传感器进行控制。数据融合树即通过融合每个中间节点接收的数据, 以使原始数据节点得到最大限度的融合。为此, 本研究基于蚁群算法的数据融合树, 完成变电站无线传感器网络控制<sup>[8]</sup>。其步骤如图1所示。

无线传感器通过最短路径完成数据的低能耗、高效传输, 采用蚁群算法求解无线传感器的最短路径树, 以获得高效的无线传感器网络数据融合控制算法。

首先生成一个或多个无线传感器的最短路径分支, 然后, 将无线传感器网络中剔除冗余后的数据<sup>[9-10]</sup>, 实行数据融合并传输至各汇聚节点(sink), 完成最终的无线传感器网络控制。

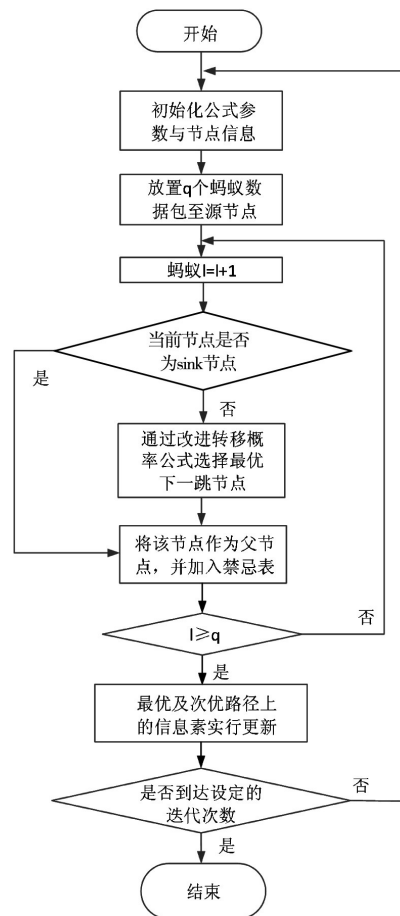


图1 无线传感器网络控制步骤

蚁群算法是通过邻近节点转发概率公式中的启发式因子和信息素, 寻找传感器的最优路径解。信息素是蚂蚁通过路径的客观频率; 启发式因素是根据邻居节点的距离、偏转角度和能量来选择下一跳父节点。偏转角如图2所示。

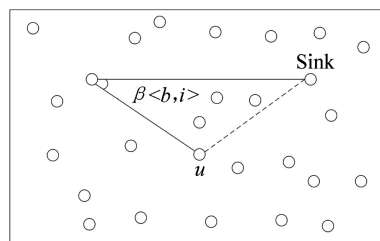


图2 偏转角

图2中,  $b, i$  表示相邻的两个节点  $\beta < b, i >$ 。偏转角值可通过节点位置信息计算得到。

因传统的蚂蚁算法存在最优解不足的问题, 故先共拓转移概率公式和信息素改进蚂蚁算法。

转移概率  $A_{ok}^l(t)$  公式如下:

$$A_{ok}^l(t) = \begin{cases} \frac{v_{ok}^\beta (m_{ok})^\alpha Y_{ko}}{\sum_{v \in allowed_l} v_{ok}^\beta (m_{ok})^\alpha}, k \in allowed_l \\ 0, otherwise \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $o, k$  表示节点,  $l$  表示第  $l$  只蚂蚁,  $\beta$  表示信息素的相对重要程度,  $\chi$  表示启发因子的相对重要程度,  $m_{ok}$  表示启发因子,  $v_{ok}^b$  表示路径  $ok$  上的信息素,  $allowed_i$  表示下一个可选取的集合。

加入偏转角排序值对启发因子实行改进, 改进其传统中蚂蚁直接进入最小选择而出现偏离的情况。

改进后启发因子  $\iota_{ok}$  公式如下:

$$\iota_{ok} = A_{ok}^l(t) + \frac{1}{R_0 - r_k} \eta_1 + \frac{1}{f_{ok}} \eta_2 + \frac{1}{\xi_{ok}} \eta_3 \quad (6)$$

式中,  $R_0$  表示初始节点能量值,  $r_k$  表示节点  $k$  的能量值,  $f_{ok}$  表示两节点距离,  $\xi_{ok}$  表示汇聚节点偏转角排序值,  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  表示权重因子。

改进后信息素  $\kappa_{ok}$  公式如下:

$$\kappa_{ok}(t+m) = (1-\sigma)\kappa_{ok}(t) + \Delta\kappa_{ok}t_{ok} \quad (7)$$

式中,  $\sigma$  表示信息挥发因子,  $\Delta\kappa_{ok}$  表示循环中的信息量。

循环中路径  $ok$  上的信息素公式如下:

$$\Delta\kappa_{ok} = \begin{cases} \frac{W}{Z_l}, & \text{蚂蚁 } l \text{ 在本次循环中经过的路径 } ok \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $Z_l$  表示第  $l$  只蚂蚁行走路径长度,  $W$  表示常数。

信息挥发因子影响蚂蚁算法的全局搜索能力, 通过自适应调节策略  $\sigma(t)$  选取最佳值, 其公式如下:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \Delta\kappa_{ok} \sigma_{init}, & t \leq T_1 \\ \mu\sigma(t-1), & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \Delta\kappa_{ok} \sigma_{min}, & t < T_2 \end{cases} \quad (9)$$

完成无线传感器最短路径树的构造后, 需进一步完成节点数据的传输。

基于中间节点需要融合数据并上传至父节点, 其中需消耗能量, 故设置能量阈值  $R_{aver}$  以均衡网络负载, 其公式如下:

$$R_{aver} = \sum_{k=1}^M \frac{R_k \sigma(t)}{M} \quad (10)$$

式中,  $M$  表示邻居节点总数,  $R_k$  表示剩余能量。

节点能量在低于阈值时, 可正常实行数据传输, 若高于阈值时, 则触发节点路由更新机制<sup>[11-13]</sup>, 更新示意图如

图3所示。

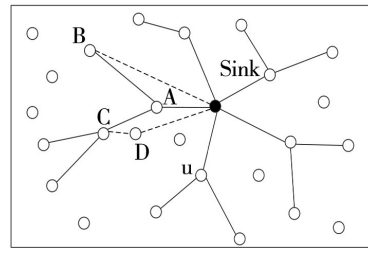


图3 路由更新

子节点重新寻找父节点或直接与汇聚节点相连, 最终完成变电站无线传感器的覆盖控制。

## 4 实验结果与分析

为了验证基于数据融合的变电站无线传感器网络控制方法的有效性, 对其完成如下测试。选用 OMNET++ 软件为实验平台, CPU 为 16Core; 内存为 128 GB; 运行环境为 Matlab 2010 编程平台, 基于 OMNET++ 软件搭建实验环境。变电站无线传感器网络参数设定如表1所示。

表1 变电站无线传感器参数设定

参数名称	数值
网络规格	100×100 m
节点个数	100个
数据包大小	100 byte
初始能量	0.5 j
接收能耗	30 nJ·bit <sup>-1</sup>
传输能耗	50 nJ·bit <sup>-1</sup>
循环次数	2 000 次
仿真时间	100 s

采用基于数据融合的变电站无线传感器网络控制方法、基于 HJB 方程的变电站无线传感器网络控制方法和基于双效用函数的变电站无线传感器网络控制方法完成实验测试。

### (1) 区域节点分布情况

在网络规格为 100 × 100 m 的无线传感器网络中, 采用数据融合方法、HJB 方程方法和双效用函数方法完成变电站无线传感器的控制, 记录其区域节点分布情况如

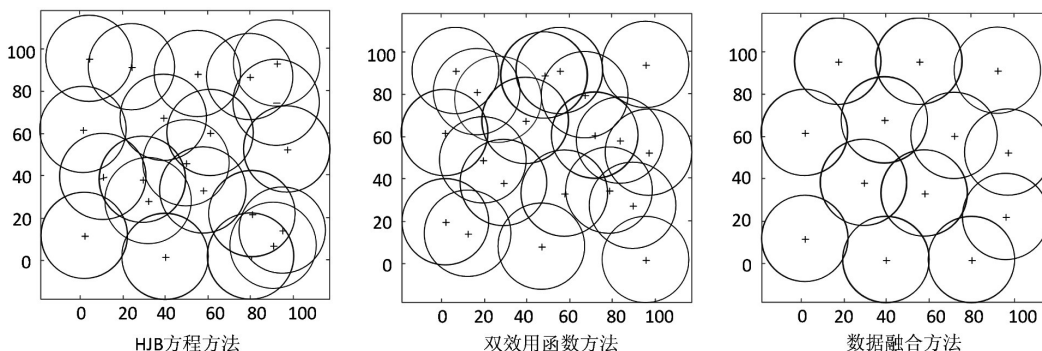


图4 三种方法的区域节点分布情况

图4所示。

分析图4可知,HJB方程方法和双效用函数方法存在区域内冗余节点过多的情况,不利于变电站无线传感器的数据融合及覆盖控制,数据融合方法经过节点剔除处理,区域内均为有用节点,利于变电站无线传感器的数据融合及覆盖控制,表明数据融合方法节点处理效果更好。

### (2) 剩余节点能量

无线传感器的效率可通过节点剩余节点能量反映。

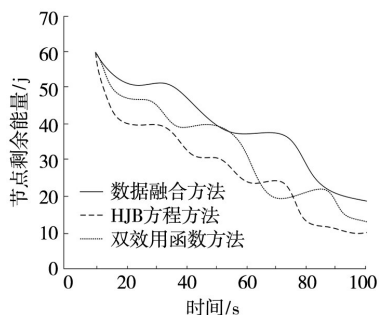


图5 三种方法的剩余网络节点能量

采用数据融合方法、HJB方程方法和双效用函数方法完成变电站无线传感器的控制,记录其剩余节点能量如图5所示。

分析图5可知,随着时间的增加,在100s时,HJB方程方法的剩余网络节点能量在10j左右,双效用函数方法的剩余网络节点能量在13j左右,数据融合方法的剩余网络节点能量在19j左右,数据融合方法的节点剩余能量高于HJB方程方法和双效用函数方法,表明数据融合方法的变电站无线传感器网络效率更高。

### (3) 网络覆盖率

采用数据融合方法、HJB方程方法、双效用函数方法完成变电站无线传感器的控制,记录三种方法的网络覆盖率如图6所示。

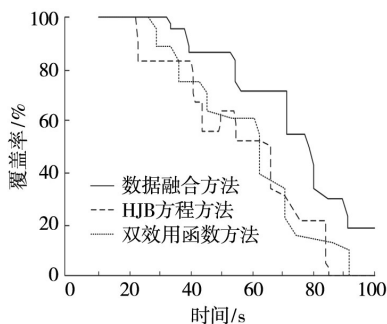


图6 三种方法的数据融合延迟比较

分析图6可知,在控制前期,随着时间的推移,HJB方程方法的网络覆盖率开始下降,随即,双效用函数方法的网络覆盖率也开始下降,在85s时,HJB方程方法的网络覆盖率下降至0,在93s时,双效用函数方法的网络覆盖率下降至0,而数据融合方法的网络覆盖率在100s时,仍

可保持在20%,表明数据融合方法的网络覆盖率更好,无线传感器网络覆盖控制效果更好。

## 5 结束语

将无线传感器用于变电站的通信技术,利于通信网络的提升,故变电站无线传感器网络控制方法一直是电力系统研究的重点问题之一,因此,提出基于数据融合的变电站无线传感器网络控制方法。通过格拉布斯准则对变电站无线传感器的网络冗余节点实行剔除处理,提高无线传感器节点传输的效率;基于蚂蚁算法的数据融合树完成的无线传感器网络控制,使网络负载更均衡,降低无线传感器节点的能耗,获得更好的无线传感器网络控制性能。该方法的研究解决传统方法中存在的问题,具有重要应用意义。

### 参考文献:

- [1] 李瑜玲,吴华瑞,黄媛,等.动态博弈下温室无线传感器网络功率控制优化[J].河北农业大学学报,2021,44(1):128-134.
- [2] 卫朝霞,刘志超,罗佳.基于能量限制的分布式无线传感器网络调度[J].探测与控制学报,2021,43(5):72-78.
- [3] 石元博,王建辉,方晓柯,等.基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计[J].控制与决策,2021,36(4):947-952.
- [4] 龚本灿,黎尚文,陈鹏.基于双效用函数的无线传感器网络拓扑博弈算法[J].计算机应用研究,2021,38(8):2445-2448.
- [5] 魏连锁,韩建,金涛,等.基于最优刚性子图的势博弈无线传感器网络拓扑优化算法[J].工程科学与技术,2021,53(2):125-132.
- [6] 张宇峰,高田.永磁同步电机无位置传感器控制研究[J].自动化技术与应用,2021,40(10):22-25.
- [7] 吴锋.一种高效的无线传感器网络目标覆盖算法[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(8):195-204.
- [8] 李思成,魏云冰,邱永露.自主多决策粒子群的无线传感器网络覆盖优化[J].仪表技术与传感器,2022(9):26-35.
- [9] 朱雯曦,黄煜栋.基于拓扑控制的无线传感器节能路由优化方法[J].电视技术,2020,44(12):57-62.
- [10] 杨美艳.基于数据驱动的无线传感器网络拥塞控制[J].沈阳工业大学学报,2022,44(5):570-574.
- [11] 陈丽琴,顾静军.基于无线传感器网络的地铁通信传输延迟优化方法[J].传感技术学报,2022,35(5):698-702.
- [12] 刘晓斌,沙宗尧.基于IACO改进Logistic混沌序列的WSN布局优化[J].自动化技术与应用,2024,43(10):131-133.
- [13] 杨志军,刘征,丁洪伟,等.基于轮询控制的无线传感器网络MAC协议性能分析[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(3):437-443.

作者简介:黄琪训(1988-),男,本科,高级工程师,研究方向:变电设备维护。